

تحلیل حساسیت اتلاف انرژی در میراگر تسلیم شونده با میله‌های کنسولی

سعیدرضا صباغ یزدی^۱، مصطفی رضوانی شریف^{۲*}، رضا ذکی بخش محمدی^۳

- ۱- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی
- ۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی
- ۳- دانشجوی دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- syazdi@kntu.ac.ir

۲- rezvanisharif@kntu.ac.ir

۳- r.zakibakhshmohammadi@email.kntu.ac.ir

چکیده:

کنترل مقدار جابه‌جایی و ضرورت اتلاف انرژی مناسب در سازه‌های جداسازی شده که تحت اثر باد و زلزله هستند، نمایانگر اهمیت استفاده از تجهیزاتی نظیر میراگرهای تسلیم شونده در کنار جداساز لرزه‌ای است. میراگرهای تسلیم شونده میله‌ای با میله‌های کنسولی، باتوجه‌به نحوه قرارگیری میله‌ها، توانایی اتلاف انرژی به‌صورت مستقل از جهت را داشته و برای استفاده در کنار جداسازهای لرزه‌ای مؤثر هستند. رفتار این میراگرها متأثر از مؤلفه‌هایی نظیر قطر میله، طول میله، تعداد میله و تنش تسلیم (مصلح) میله است. در این پژوهش پس از مدل‌سازی یک میراگر میله‌ای با میله کنسولی در نرم‌افزار اجزا محدودی آباکوس، اثر ایجاد تغییر در هریک از مؤلفه‌های مذکور بر میزان اتلاف انرژی میراگر بررسی شده است. نتایج بررسی در این پژوهش نشان داد، اتلاف انرژی در این میراگر، بیشترین حساسیت را به ترتیب نسبت به مؤلفه‌های قطر میله، تعداد میله، طول میله و تنش تسلیم میله دارد.

واژگان کلیدی:

اتلاف انرژی، میراگر تسلیم شونده، میراگر میله‌ای کنسولی، سازه جداسازی شده.

* مصطفی رضوانی شریف، دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی.

ایمیل: rezvanisharif@kntu.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

sensitivity analysis of energy dissipation in a yielding damper with a cantilever bars

S. R. Sabbagh Yazdi ^۱, M. Rezvani Sharif ^۲, R. Zakibakhsh Mohammadi ^۳

^۱- Professor, Faculty of Civil Engineering of K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

^۲- Associate Prof., Faculty of Civil Engineering of K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

^۳- Ph.D Student of Structural Engineering of K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

Abstract:

Seismic isolators serve a vital function in mitigating structural damage resulting from lateral loads and in diminishing the forces exerted upon the structure. In structures that are isolated, the displacement may experience a substantial increase, which, in the case of bridges, could potentially result in the collapse of the deck from its supports. In addition, isolator systems may have low energy absorption capacity. Controlling displacement and ensuring adequate energy dissipation in isolated structures under wind and earthquake loads prove the importance of incorporating devices like energy dampers alongside seismic isolators. Yielding dampers are a category of dampers recommended in previous research, that are produced various types. These dampers utilize the inelastic deformation of ductile metals for dissipating the energy. One effective type of damper for energy dissipation in isolated structures is the bar-shaped damper with cantilever bars. In these dampers, the bars are positioned vertically, so that energy is dissipated regardless of the direction. The energy-absorbing elements in these dampers are the cantilever bars, with one end connected to the substructure and the other to the isolated structure. As relative displacement occurs between the substructure and isolated structure, the bars undergo bending and enter the plastic deformation range, so that dissipating earthquake energy occurs. The behavior of these dampers is influenced by parameters such as bar diameter, bar length, number of bars, and bar yield stress. Hence, determining the effect of each parameter on damper performance is crucial for selecting a suitable damper. In this study, after modeling a bar damper with a cantilever bar in the ABAQUS finite element software, the effect of changes in each of these parameters on the damper's energy dissipation was analyzed. The results demonstrate that energy dissipation in this damper is most sensitive to changes in bar diameter, followed by the number of bars, bar length, and bar yield stress.

Keywords: Energy dissipation, yielding damper, cantilever bar damper, isolated structure

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

با توجه به احتمال وقوع حوادثی نظیر زلزله‌های شدید و در نتیجه بروز خسارت‌های جانی و مالی، لازم است سازه‌ها توانایی مقابله با بارهای جانبی ناشی از این حوادث را داشته باشند. یکی از روش‌هایی که جهت کاهش اثرات نیروهای جانبی نظیر زلزله در سازه‌ها به کار می‌رود، استفاده از جداساز لرزه‌ای است. استفاده از جداساز، مانع از انتقال بخش زیادی از شتاب ناشی از زلزله از زیرسازه به سازه جداسازی شده می‌شود. باین حال میرایی این سیستم‌ها عموماً کم بوده و استفاده از این روش ممکن است منجر به مشکلاتی نظیر جابه‌جایی بیش از حد در سازه جداسازی شده گردد. در سازه‌های ساختمانی جداسازی شده، به دلیل محدودیت‌هایی نظیر حفظ فاصله از ساختمان‌های مجاور لازم است مقدار جابه‌جایی سازه محدود گردد. در پل‌ها نیز، جابه‌جایی بیش از حد عرشه ممکن است موجب سقوط عرشه از پایه‌های پل شود؛ بنابراین کنترل جابه‌جایی در سازه‌های جداسازی شده امری ضروری است.

یکی از روش‌هایی که برای افزایش میزان اتلاف انرژی و محدود کردن مقدار جابه‌جایی در سازه‌های جداسازی شده استفاده می‌گردد، نصب میراگرهایی نظیر میراگرهای تسلیم شونده در کنار جداساز لرزه‌ای است. در این راستا واتی^۱ [۱] در سال ۲۰۱۱ استفاده از میراگر فلزی جاری شونده، به جای بلوک‌های برشی معمولی، جهت کنترل نیروی عرضی ناشی از زلزله در پل‌ها را پیشنهاد کرد. کلید برشی پیشنهادی متشکل از چندین صفحه فولادی X شکل موازی بود که به یک صفحه فولادی مستطیلی در پایین و به یک عضو فولادی در بالا متصل می‌شدند. در این میراگر جابه‌جایی‌های جانبی روسازه در هنگام زلزله باعث ایجاد بارهای چرخه‌ای در ورق‌های X شکل شده و انرژی زلزله مستهلک می‌گردد.

دیکلی و میلانی^۲ [۲] در سال ۲۰۱۵ میراگر هیستریزس پیچشی چند جهته (MTHD) را برای حفاظت لرزه‌ای پل‌ها ارائه کردند. عملکرد این میراگر بر اساس تسلیم پیچشی هسته‌های استوانه‌ای فولادی بود. این سیستم دارای سختی پس الاستیک بوده

که در محدود کردن جابه‌جایی جانبی عرشه جداسازی شده لرزه‌ای در نزدیک گسل مؤثر است.

ژیانگ و لی^۴ [۳] نیز در سال ۲۰۱۶، عملکرد لرزه‌ای سه وسیله کنترل جابه‌جایی پل (کلید برشی بتنی، میراگر فلزی تسلیم شونده و میراگر اصطکاکی) را بررسی کردند. نتایج بررسی‌های این محققین نشان داد که اگر از هیچ وسیله‌ای برای کنترل حرکات پل استفاده نشود، لغزش بین شاه‌تیر و تکیه‌گاه لاستیکی صورت گرفته و تکیه‌گاه لاستیکی مانند جداساز برای پایه پل عمل می‌کند اما این مسئله در تغییر شکل‌های بزرگ ممکن است منجر به سقوط عرشه پل گردد. همچنین مشخص گردید، میراگرهای تسلیم شونده به علت سخت‌شوندگی کرنشی، منجر به جابه‌جایی پسماند کوچک‌تر در تکیه‌گاه‌های لاستیکی نسبت به سایر روش‌ها می‌شوند. استفاده از میراگرهای تسلیم شونده و میراگرهای اصطکاکی به همراه تکیه‌گاه‌های لاستیکی باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای پل شد.

شن^۵ و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۷ میراگر فولادی عرضی (TSD) را جهت استفاده کنار تکیه‌گاه لغزشی در پل‌ها با دهانه بلند ارائه کردند. این میراگر متشکل از چندین صفحه فولادی مثلی با نیمکره‌های فولادی در بالای ورق بود. نیمکره‌ها، علاوه بر فراهم کردن امکان حرکت آزاد پل در جهت طولی، سبب شدند که حرکت پل در جهت عرضی در مسیر قابل اعتماد صورت گیرد. در این سیستم بیشتر انرژی توسط ورق‌های TSD مستهلک شده و سهم تکیه‌گاه‌های لاستیکی ناچیز است. ژو^۷ و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۹ جهت بررسی کارایی میراگر TSD بر روی پل کابلی با دهانه بلند تحت اثر زلزله‌های نزدیک و دور از گسل، آزمایش‌هایی را روی یک پل کابلی با دهانه یک کیلومتر و با مقیاس ۱:۳۵ با استفاده از میز لرزه انجام دادند. بررسی‌ها نشان داد که استفاده از این میراگر، تقاضای جابه‌جایی عرضی و انحنا در امتداد ستون‌های برج را کاهش می‌دهد. حائری^۸ و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۹ یک جداساز ترکیبی متشکل از تکیه‌گاه الاستومری و قطعات لغزنده و میراگرهای تسلیم شونده را ارائه کردند. در این سیستم قسمت جاری شونده از ورق‌های X شکل

^۵ Shen

^۶ Transverse Steel Damper

^۷ Zhou

^۸ Haeri

^۱ Vasseghi

^۲ Dicleli & Milani

^۳ Multi-directional Torsional Hysteretic Damper

^۴ Xiang & Li

تشکیل می‌شد. نیروی اصطکاک ناشی از لغزش صفحات فولادی در این سیستم، میرایی را در کرنش‌های برشی کم و متوسط فراهم می‌کرد، درحالی‌که ورق‌های میراگر تسلیم شونده (ADAS)^۱ به‌عنوان یک سیستم جاذب انرژی در کرنش‌های برشی بالا در نظر گرفته می‌شدند.

در میراگرهای تسلیم شونده قابلیت تعویض‌پذیری عضو جاذب انرژی، پس از تجربه زلزله از اهمیت زیادی برخوردار است. از این رو لازم است عضو جاذب انرژی به نحوی انتخاب گردد که به راحتی بتوان آن را تعویض کرد. اعضای میله‌ای باتوجه به شکل ساده و قابلیت تعویض‌پذیری خود در بسیاری از پژوهش‌ها به‌عنوان عضو جاذب انرژی در نظر گرفته شدند. بر اساس نحوه عملکرد و شکل تحلیلی این میراگرها، آن‌ها را می‌توان به‌صورت زیر تقسیم‌بندی کرد: ۱- میله‌های یک‌سر گیردار-یک‌سر گیردار لغزنده ۲- میله‌های دوسرگیردار ۳- میله‌های دو سر مفصل ۴- میله‌های کنسولی. در میراگرهای با میله به‌صورت یک‌سر گیردار - یک‌سر گیردار لغزنده، باتوجه به دیاگرام لنگر خمشی، مقدار لنگر در دو سر میله بیشینه است، بنابراین در میله‌هایی که در آن‌ها از این روش جهت استهلاک انرژی استفاده می‌شود، محدوده دو انتهای میله وارد محدوده تغییر شکل‌های پلاستیک شده و انرژی ورودی را مستهلک می‌کنند. در این راستا، فهیم پور و عباس نیا^۲ [۷] در سال ۲۰۰۸ تأثیر قرارگیری میله در محل اتصال مهاربند به ورق اتصال گوشه، به‌عنوان عضو شکل‌پذیر را بررسی کردند. بنی شیخ‌الاسلام^۳ و همکاران [۸] نیز در سال ۲۰۱۶ استفاده از این میله‌ها در محل اتصال تیر به ستون به‌عنوان عضو جاذب انرژی را بررسی نمودند.

در میراگرهای با میله دوسرگیردار تحت جابه‌جایی وسط دهانه، بر اساس دیاگرام لنگر خمشی میله، مقدار لنگر در دو سر میله و وسط دهانه بیشینه است، بنابراین این میله‌ها، در محدوده وسط دهانه و دو انتهای خود وارد محدوده تغییر شکل‌های پلاستیک شده و انرژی را تلف می‌کنند. در این راستا گلزن^۴ و همکاران [۹] در سال ۲۰۱۷ از

میراگر هیستریزیس تشکیل شده از میله‌های فولادی به‌صورت افقی، به‌عنوان میراگر کمکی برای جداسازهای الاستومری در پل‌ها استفاده کرده و روشی ساده شده برای طراحی این میراگرها ارائه کردند. آغلار^۵ و همکاران [۱۰، ۱۱] نیز در سال ۲۰۱۸ از میله و لوله به‌صورت دوسرگیردار به‌عنوان عضو جاذب انرژی در مهاربندهای همگرا استفاده کردند.

در میراگرهای با میله به‌صورت دو سر مفصل، بر اساس دیاگرام لنگر خمشی، مقدار لنگر در وسط میله بیشینه بوده و در دو سر آن صفر است. از این رو در این روش میله‌های مخروطی، جهت ثابت نگه‌داشتن انحنا و استفاده حداکثر از مصالح، به کار گرفته می‌شوند. در این راستا لیو^۶ و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۳ سیستم عملکرد یکپارچه تکیه‌گاه و میراگر استوانه‌ای فولادی (FICSDB)^۷ را ارائه کردند. این سیستم ویژگی‌های خاصی مانند جداسازی لرزه‌ای، اتلاف انرژی و محدودیت جابه‌جایی را در خود جای داده است. در این سیستم استهلاک انرژی توسط میله‌های مخروطی دو سر مفصل انجام می‌گیرد.

در میراگرهای با میله‌های کنسولی، بر اساس شکل تحلیلی و دیاگرام لنگر خمشی، مقدار لنگر در انتهای گیردار میله بیشینه بوده در سر آزاد میله صفر است. از این رو در این روش از میله‌های مخروطی، جهت ثابت نگه‌داشتن انحنا و در نتیجه بهره‌گیری از ظرفیت کل عضو، استفاده می‌گردد. در این راستا چیاروتو^۸ و همکاران [۱۳] در سال ۲۰۰۴ از میله‌های مخروطی کنسولی در کنار جداساز لرزه‌ای در پل استفاده کردند. زلاتکوف^۹ و همکاران [۱۴] نیز در سال ۲۰۲۲، میراگر لرزه‌ای چندسطحی چند جهته را معرفی کردند. این میراگر از یک بیس پلیت که به فونداسیون متصل شده و دو گروه اعضای عمودی با مقطع دایره‌ای به‌صورت مخروطی و یک صفحه فعال‌کننده میانی که به سازه جداسازی شده متصل بوده، تشکیل شده است. در هنگام زلزله، صفحه فعال‌کننده فولادی میانی به همراه سازه اصلی حرکت کرده و باعث خمش اجزای عمودی شده و تغییر شکل پلاستیک این

^۶ Liu

^۷ Functionally Integrated Cylindrical Steel Damper Bearing

^۸ Chiarotto

^۹ Zlatkov

^۱ Added Damping And Stiffnes

^۲ Fahimpour & Abbasnia

^۳ Banisheikhholeslami

^۴ Golzan

^۵ Aghlara

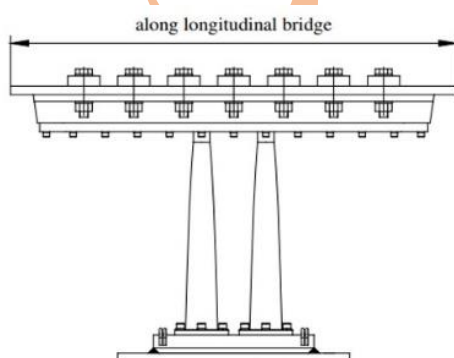
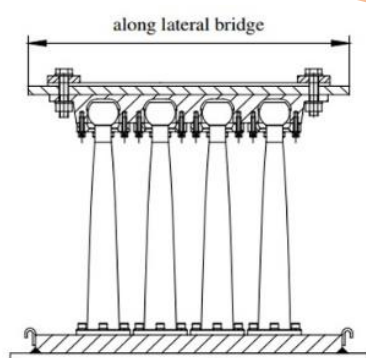
۲ - معرفی میراگر مورد پژوهش

در میراگرهای با میله‌های کنسولی، مطابق شکل (۱) میله‌ها به صورت عمودی در کنار جداساز لرزه‌ای قرار می‌گیرند. از این رو این میله‌ها بدون توجه به جهت ارتعاش می‌توانند انرژی‌های ورودی ناشی از زلزله را مستهلک کنند. در این میراگرها قسمت پایین میله‌ها به زیرسازه متصل شده و قسمت بالای آن‌ها به وسیله یک تکیه‌گاه مفصلی به سازه جداسازی شده متصل می‌گردد. به این ترتیب با ایجاد جابه‌جایی نسبی بین سازه جداسازی شده و زیرسازه میله‌ها تحت خمش قرار گرفته و با ورود به محدوده تغییر شکل‌های غیرالاستیک انرژی زلزله را مستهلک می‌کنند.

میراگرهای میله‌ای با میله‌های کنسولی، انرژی زلزله را از طریق مکانیزم خمشی مستهلک می‌کنند. مطابق شکل (۲)، در این میراگرها مقدار لنگر خمشی در انتهای گیردار میله حداکثر بوده و در انتهای آزاد آن صفر است؛ بنابراین جهت استفاده بهینه از میله و ایجاد تسلیم هم‌زمان در سراسر آن، از میله با مقطع متغیر (میله مخروطی) استفاده می‌شود. نحوه‌ی کاهش قطر میله، به نحوی انتخاب می‌گردد که انحنا در طول میله ثابت باشد؛ به این ترتیب کل میله به صورت هم‌زمان به تنش تسلیم می‌رسد.

اعضا موجب استهلاک انرژی می‌گردد. هو^۱ و همکاران [۱۵] در سال ۲۰۲۳ برای کاهش ارتعاش طولی پل‌های معلق راه‌آهن، یک سیستم میراگر ترکیبی ویسکوز - فولادی (CVSDS)^۲ ارائه کردند. در این سیستم، قسمت ویسکوز در هنگام تغییر دما، ترمز قطار و زلزله‌های خفیف و قسمت فولادی در زلزله‌های شدید عمل می‌کند. در این سیستم نیز از میله‌های کنسولی به عنوان عضو جاذب انرژی استفاده گردید.

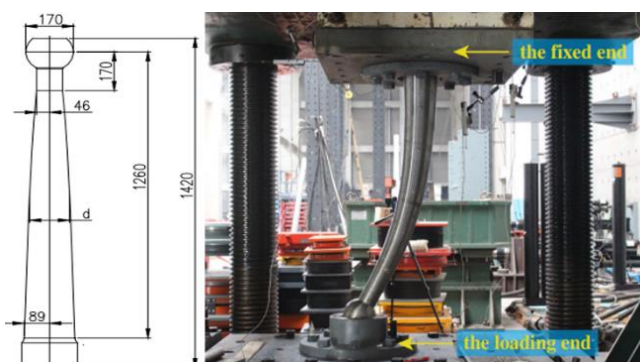
میراگرهای میله‌ای با میله‌های کنسولی با توجه به نحوه قرارگیری میله‌ها در آن‌ها قابلیت اتلاف انرژی زلزله در جهات مختلف را دارند. مؤلفه‌های مختلفی می‌توانند بر عملکرد این میراگرها و میزان اتلاف انرژی توسط آن‌ها مؤثر باشند. از این رو تحلیل حساسیت بر روی این مؤلفه‌ها در انتخاب میله‌های مناسب، اهمیت زیادی دارد. در این پژوهش تلاش می‌گردد با انجام تحلیل حساسیت بر روی مؤلفه‌های مؤثر بر رفتار این میراگرها با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، وابستگی اتلاف انرژی به هر مؤلفه آشکار گردد. در واقع هدف از انجام این پژوهش شناخت بیشتر رفتار این نوع میراگر و آشکارسازی میزان وابستگی اتلاف انرژی نسبت به مؤلفه‌های متغیر و کمک به طراحان جهت انتخاب راحت‌تر هر مؤلفه است.



شکل ۱: میراگر تسلیم شونده با میله‌های کنسولی [۱۶]

^۲ Combined Viscous-Steel Damping System

^۱ Hu



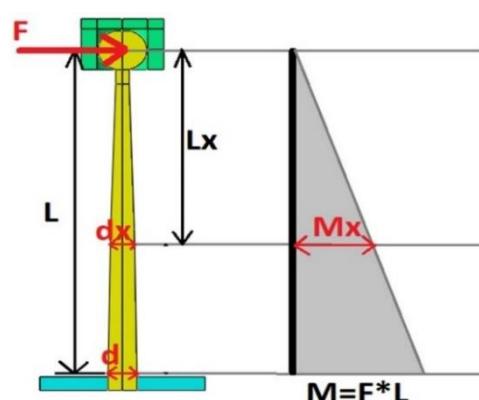
شکل ۳: میراگر میله‌ای کنسولی تحت آزمایش چرخه‌ای

جهت انجام صحت‌سنجی ابتدا یک میله مشابه آزمایش در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی شد. مصالح میله، مطابق مرجع [۱۶]، Steel ۳۴۵ در نظر گرفته شد. برای مدل‌سازی مصالح از مدل دوخطی با سخت‌شوندگی ترکیبی^۲ (ترکیبی از سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک) استفاده شد. به علت عدم ذکر اطلاعات مربوط به مصالح، با توجه به مرجع [۱۷] و ضخامت میله، تنش تسلیم میله، تنش و کرنش گسیختگی به ترتیب ۲۷۵ مگاپاسکال، ۵۵۰ مگاپاسکال و ۰/۱۸ در نظر گرفته شد. برای در نظر گرفتن اثرات سخت‌شوندگی از سخت‌شوندگی چرخه‌ای^۳ استفاده گردید. ضرایب سخت‌شوندگی مصالح با استفاده از آزمون و خطا مطابق جدول ۱ به دست آمد.

جدول ۱: ضرایب سخت‌شوندگی در نظر گرفته شده در مدل‌سازی عددی مدل صحت‌سنجی

Equivalent stress (MPa)	Q-infinity	Hardening parameter b
۲۷۵	۱۴۰	۵

پس از مدل‌سازی و اعمال بارگذاری، منحنی هیستریزیس مطابق شکل (۴) به دست آمد. همان‌طور که مشخص است این منحنی انطباق خوبی با منحنی حاصل از بررسی تجربی و بررسی عددی گائو و وانگ [۱۶] دارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌سازی انجام شده می‌تواند جهت بررسی رفتار میراگر مناسب باشد.



شکل ۲: دیاگرام لنگر خمشی در طول میله

۳- راستی آزمایشی مدل‌سازی

به منظور تأیید نحوه‌ی مدل‌سازی و توانایی مدل‌های عددی در نمایش رفتار میراگر، لازم است ابتدا مدل‌های عددی با نمونه‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی شوند. برای این منظور از پژوهش آزمایشگاهی انجام شده توسط گائو و وانگ^۱ [۱۶] استفاده می‌گردد. مطابق شکل (۳)، در این آزمایش از یک میله به شعاع بیشینه ۸۹ میلی‌متر و طول ۱۴۲۰ میلی‌متر، به عنوان عضو جاذب انرژی استفاده شده است. نیروی طراحی برای این آزمایش ۲۵۰ کیلو نیوتن و جابه‌جایی هدف ۳۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. این میله با استفاده از یک صفحه در بالای میله و یک صفحه در پایین آن و با استفاده از پیچ و مهره پر مقاومت به دستگاه آزمایش متصل شد. در طول آزمایش، قسمت بالایی میله ثابت و پایین آن تحت بارگذاری قرار گرفت. این میراگر ابتدا تحت بارگذاری چرخه‌ای با پنج سیکل تحت ۰/۲۵ برابر جابه‌جایی هدف، پنج سیکل تحت ۰/۵ برابر جابه‌جایی هدف و ده سیکل تحت جابه‌جایی هدف و با متوسط نرخ بارگذاری ۲ میلی‌متر بر ثانیه قرار گرفت. پس از پایان آزمایش، مشاهده شد که هیچ شکستگی یا ترک‌ی در میله و سایر اجزای اتصال رخ نداد. جهت بررسی بیشتر رفتار این میراگر دو آزمایش دیگر با سرعت‌های مختلف و با دامنه ۳۰۰ میلی‌متر، تا لحظه شکست میله انجام شد. نتایج آزمایش نشان داد که میراگرهای تحت دو نوع بارگذاری با سرعت‌های مختلف توانست ۴۱ و ۵۲ سیکل با دامنه ۳۰۰ میلی‌متر را علاوه بر بارگذاری قبلی تحمل کند.

^۳ cyclic hardening

^۱ Gao & Wang

^۲ combined

$$\xi_{ed} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_D}{E_{S0}} \quad (1)$$

در این رابطه، E_D انرژی مستهلک شده در یک حلقه کامل بارگذاری و E_{S0} انرژی ذخیره شده توسط یک فنر الاستیک با حداکثر نیرو و جابه‌جایی حلقه مورد نظر، است. مقدار E_{S0} از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$E_{S0} = \frac{Ku_0^2}{2} = \frac{1}{2} K_{eff} \left(\frac{|\delta_{i,max}^+| + |\delta_{i,max}^-|}{2} \right)^2 \quad (2)$$

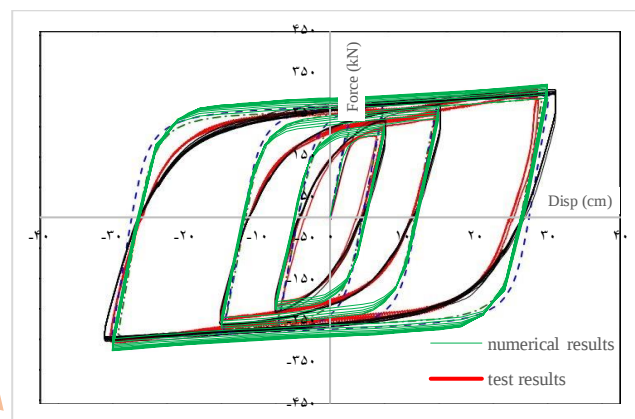
در این رابطه K_{eff} سختی مؤثر بوده و مقدار آن از رابطه ۳ بدست می‌آید.

$$K_{eff}^i = \frac{\left| \frac{P_{i,max}^+}{\delta_{i,max}^+} + \frac{P_{i,max}^-}{\delta_{i,max}^-} \right|}{2} \quad (3)$$

همان‌طور که پیش‌تر ذکر گردید، جهت مدل‌سازی از نرم‌افزار آباکوس استفاده می‌شود. مدل‌سازی قسمت‌های مختلف با استفاده از المان solid و شبکه‌بندی اعضا، با استفاده از المان هشت‌گره‌ای با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته (C^3D^8R) انجام می‌گردد. برای مدل‌سازی مصالح میله‌ها از مدل دوخطی و سخت‌شوندگی ترکیبی (ترکیبی از سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک) استفاده شده و مشخصات مصالح و مولفه‌های مربوط به سخت‌شوندگی مطابق جدول ۳ منظور می‌گردد.

برای تحلیل مدل‌های ساخته شده، از شیوه‌نامه بارگذاری ASCE 7-22 [۱۹] استفاده می‌گردد. بر طبق این شیوه‌نامه، هر میراگر باید تحت بارگذاری چرخه‌ای، با ۱۰ سیکل کامل تحت ۰/۳۳ برابر جابه‌جایی ناشی از بیشترین زلزله مورد انتظار (MCE)، پنج سیکل کامل تحت ۰/۶۷ برابر جابه‌جایی ناشی از بیشترین زلزله مورد انتظار و سه سیکل کامل تحت یک برابر جابه‌جایی ناشی از بیشترین زلزله مورد انتظار قرار گیرد. میراگرهای مورد بررسی با فرض جابه‌جایی هدف برابر ۱۵ سانتی‌متر تحلیل می‌گردند. در ادامه تأثیر تغییر در مؤلفه‌های مختلف بررسی می‌گردد.

مقادیر کرنش برای نمونه‌های آزمایشگاهی در مرجع [۱۶] ذکر نگردید، با این حال مقادیر کرنش پلاستیک معادل ($PEEQ^1$) برای مدل تحت بارگذاری اول و مدل تحت بارگذاری تا لحظه گسیختگی، در مدل صحت‌سنجی به ترتیب ۱/۴ و ۷/۳۷ به دست آمد.



شکل ۴: مقایسه منحنی هیستریزیس صحت‌سنجی و مدل آزمایشگاهی

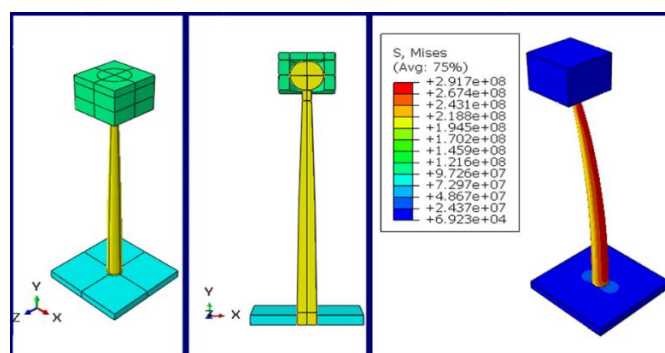
۴ - مطالعه عددی

جهت بررسی عملکرد میراگر میله‌ای با میله‌های کنسولی، مدل ۱۴ مختلف، در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی می‌گردد. برای تشخیص اثر تغییر مؤلفه‌های مختلف بر رفتار میراگر، ابتدا یک میله به طول یک متر، قطر هفت سانتی‌متر (قطر قسمت انتهای گیردار میله) و تنش تسلیم ۲۱۵ مگاپاسکال (فولاد S۲۳۵) مطابق شکل (۵) مدل‌سازی شده، سپس مؤلفه‌های مختلف مطابق جدول (۲) افزایش می‌یابند و تأثیر عوامل مختلف بر میزان اتلاف انرژی، میرایی ویسکوز معادل یا میرایی مؤثر (ξ_{eq}) و سختی مؤثر (K_{eff}) مقایسه می‌شوند.

میرایی مؤثر رفتار یک سیستم غیرخطی را با یک سیستم خطی با میرایی ویسکوز، معادل‌سازی می‌کند. رایج‌ترین روش برای تعریف میرایی ویسکوز معادل، معادل‌سازی انرژی تلف شده در یک چرخه ارتعاش سازه واقعی و یک سیستم ویسکوز معادل است. نسبت میرایی ویسکوز معادل (ξ_{eq}) از رابطه ۱ به دست می‌آید [۱۸]:

^۲ American Society of Civil Engineers

^۱ Equivalent plastic strain



شکل ۵: نحوه‌ی مدل‌سازی میله کنسولی در نرم‌افزار آباکوس

جدول ۲: ابعاد مدل‌ها

شماره مدل	متغیر	قطر میله (cm)	طول میله (cm)	تنش تسلیم (MPa)	تعداد میله	تغییرات مؤلفه متغیر
۱	مدل مبنا	۷	۱۰۰	۲۱۵	۱	-
۲	قطر میله (d)	۷/۹۸	۱۰۰	۲۱۵	۱	۱۴٪
۳		۸/۷۵	۱۰۰	۲۱۵	۱	۲۵٪
۴		۱۰/۵	۱۰۰	۲۱۵	۱	۵۰٪
۵		۱۲/۲۵	۱۰۰	۲۱۵	۱	۷۵٪
۶		۱۴	۱۰۰	۲۱۵	۱	۱۰۰٪
۷	طول میله (L)	۷	۱۱۴	۲۱۵	۱	۱۴٪
۸		۷	۱۲۵	۲۱۵	۱	۲۵٪
۹		۷	۱۵۰	۲۱۵	۱	۵۰٪
۱۰		۷	۱۷۵	۲۱۵	۱	۷۵٪
۱۱		۷	۲۰۰	۲۱۵	۱	۱۰۰٪
۱۲	تنش تسلیم (f_y)	۷	۱۰۰	۲۴۵/۱	۱	۱۴٪
۱۳		۷	۱۰۰	۳۲۲/۵	۱	۵۰٪
۱۴	تعداد میله (n)	۷	۱۰۰	۲۱۵	۲	۱۰۰٪

جدول ۳: مشخصات مصالح فولاد S۲۳۵

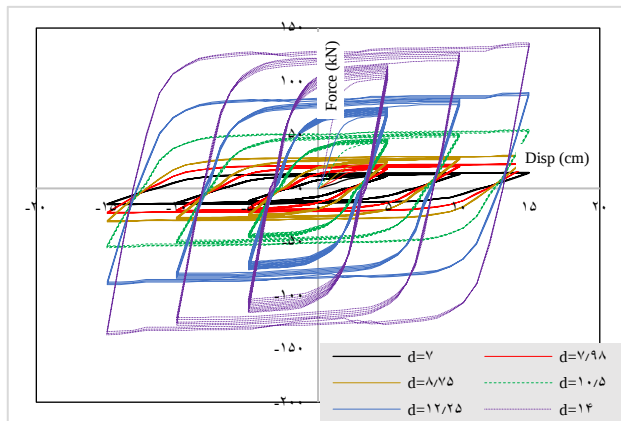
σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	ϵ_u	Equivalent stress (MPa)	Q-infinity	Hardening parameter b
۲۱۵	۴۳۵	۰/۲۵	۲۱۵	۸۰	۵

۴-۱- تأثیر قطر میله

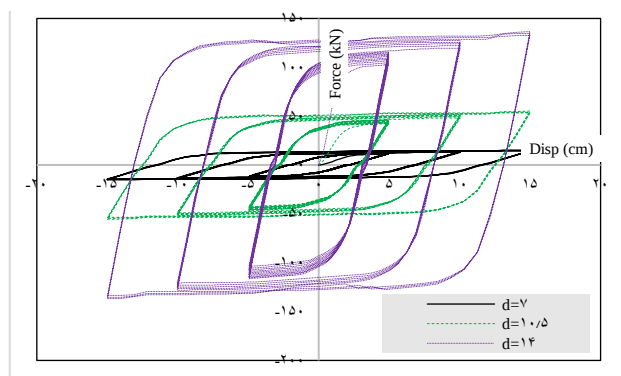
قطر قسمت انتهایی میله در مدل مبنا برابر ۷ سانتی‌متر است، جهت بررسی تأثیر تغییر قطر بر میزان اتلاف انرژی، از مدل‌هایی با قطرهای

۷/۹۸، ۸/۷۵، ۱۰/۵، ۱۲/۲۵ و ۱۴ سانتی‌متر (به ترتیب با ۱۴، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد افزایش در قطر میله) استفاده می‌شود. منحنی بارگذاری چرخه‌ای مدل‌ها مطابق شکل (۶) است. جهت مشاهده بهتر

همان‌طور که در این جدول مشخص است، افزایش ضخامت میله موجب افزایش سختی و میرایی مؤثر می‌گردد. همچنین افزایش کرنش پلاستیک معادل (PEEQ) نشان‌دهنده این است که با افزایش ضخامت میله، پلاستیسیته بیشتری در میله اتفاق می‌افتد.



شکل ۶: منحنی‌های هیستریزس برای قطرهای مختلف (d)



شکل ۷: منحنی‌های هیستریزس برای قطرهای ۷، ۱۰/۵ و ۱۴ سانتی‌متر

تأثیر قطر بر منحنی هیستریزس، منحنی‌های مربوط به مدل‌های ۱، ۴ و ۶ به ترتیب با قطرهای ۷، ۱۰/۵ و ۱۴ سانتی‌متر در شکل (۷) آورده شده است.

باتوجه به روابط (۴) و (۵) سختی میله کنسولی متناسب با ممان اینرسی و در نتیجه توان چهارم قطر است. با افزایش قطر میله سختی میله افزایش زیادی داشته و در نتیجه میزان اتلاف انرژی توسط میله افزایش می‌یابد. از طرفی باتوجه به رابطه (۶)، نیروی تسلیم با مساحت (توان دوم قطر) رابطه مستقیم دارد، به این ترتیب با افزایش قطر میله، مقدار مصالح مشارکت‌کننده در اتلاف انرژی افزایش یافته و به همین دلیل میزان اتلاف انرژی افزایش محسوسی دارد. مقدار افزایش انرژی تلف شده برای مدل‌های ۱ الی ۶ مطابق جدول (۴) است. همان‌طور که در این جدول مشخص است، استفاده از میله با قطر ۱۴ سانتی‌متر (افزایش ۱۰۰ درصدی در قطر میله نسبت به مدل مبنا) موجب افزایش ۱۰۸۲ درصد در میزان انرژی تلف شده است.

$$K = \frac{3EI}{L^3} \quad (۴)$$

$$I = \frac{\pi d^4}{64} \quad (۵)$$

$$F_y = \sigma_y A \quad (۶)$$

در این روابط E مدول الاستیسیته میله، I ممان اینرسی میله، L طول میله، d قطر میله، A مساحت مقطع میله، σ_y تنش تسلیم میله و F_y نیروی مورد نیاز جهت تسلیم میله است.

علاوه بر انرژی تلف شده، مقادیر سختی مؤثر، میرایی مؤثر و کرنش پلاستیک معادل برای مدل‌های مختلف نیز مطابق جدول (۴) است.

جدول ۴: تغییرات معیارهای ارزیابی نسبت به تغییر قطر میله

شماره مدل	قطر میله (cm)	افزایش قطر (درصد)	انرژی تلف شده (kJ)	تغییرات اتلاف انرژی بر حسب درصد	K_{eff}	تغییرات K_{eff}	$\xi_{eff}(\%)$	تغییرات ξ_{eff}	PEEQ
۱	۷	-	۴۳/۹۳	-	۱	-	۴۵/۵	-	۰/۲۷
۲	۷/۹۸	۱۴٪	۷۳/۵۳	۶۷٪	۱/۵۵	۵۵٪	۴۷/۷	۵٪	۰/۳۶
۳	۸/۷۵	۲۵٪	۱۰۲	۱۳۲٪	۲/۰۷	۱۰۷٪	۴۸/۴	۶٪	۰/۳۷
۴	۱۰/۵	۵۰٪	۱۹۳/۲۴	۳۴۰٪	۳/۶۸	۲۶۸٪	۵۰	۱۰٪	۰/۴۷
۵	۱۲/۲۵	۷۵٪	۳۲۹/۸۸	۶۵۱٪	۵/۹۹	۵۰۰٪	۵۱/۲	۱۳٪	۰/۵۸
۶	۱۴	۱۰۰٪	۵۱۹/۳۸	۱۰۸۲٪	۹/۱۱	۸۱۲٪	۵۲/۲	۱۵٪	۰/۶۷

۴-۲- تأثیر طول میله

طول میله در مدل مینا برابر ۱۰۰ سانتی متر است، مدل هایی با طول های ۱۱۴، ۱۲۵، ۱۵۰، ۱۷۵ و ۲۰۰ سانتی متر (به ترتیب با ۱۴، ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد افزایش در طول میله) برای تشخیص اثر طول میله بر میزان اتلاف انرژی انتخاب شدند. منحنی بارگذاری چرخه ای مدل ها مطابق شکل (۸) است. جهت نمایش بهتر تأثیر طول بر میزان اتلاف انرژی، منحنی های مربوط به مدل های ۱، ۹ و ۱۱ به ترتیب با طول های ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ سانتی متر در شکل (۹) قابل مشاهده است.

باتوجه به رابطه (۴) سختی میله کنسولی با توان سوم طول رابطه عکس دارد. همان طور که در شکل های ۸ و ۹ مشخص است، افزایش طول میله موجب کاهش شدید در سختی میله شده و در طول های زیاد، سبب می گردد میله در جابه جایی های بزرگ و در نتیجه با تأخیر تسلیم گردد. مقدار اتلاف انرژی، کرنش پلاستیک معادل، سختی و میرایی مؤثر برای طول های مختلف مطابق جدول (۵) است. همان طور که در این جدول مشخص است افزایش ۱۰۰ درصدی در طول میله و استفاده از میله به طول ۲۰۰ سانتی متر به جای میله ۱۰۰ سانتی متری موجب کاهش ۹۳ درصدی در میزان اتلاف انرژی و کاهش ۶۵ درصدی در میرایی مؤثر شده است. با مقایسه مقادیر کرنش پلاستیک معادل مشاهده می شود که افزایش طول میله موجب کاهش ورود مصالح به ناحیه پلاستیک شده است.

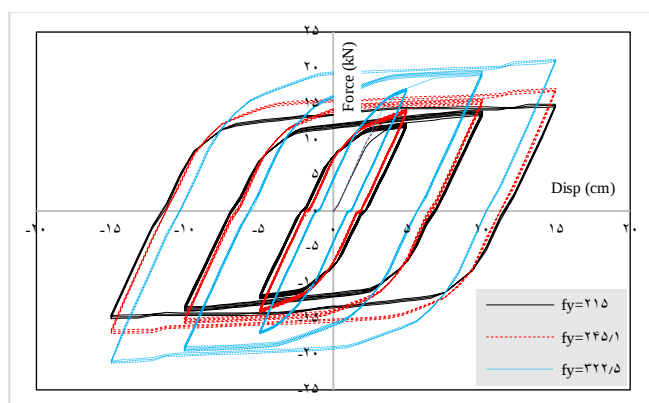
جدول ۵: تغییرات معیارهای ارزیابی نسبت به تغییر طول میله

شماره مدل	طول میله (cm)	تغییر طول میله (درصد)	انرژی تلف شده (kJ)	تغییرات اتلاف انرژی بر حسب درصد	K_{eff}	تغییرات K_{eff}	ξ_{eff} (%)	تغییرات ξ_{eff}	PEEQ
۱	۱۰۰	-	۴۳/۹۳	-	۱	-	۴۵/۵	-	۰/۲۷
۷	۱۱۴	۱۴٪	۳۲/۴	٪-۲۶	۰/۸۶	٪-۱۴	۴۱/۸	٪-۸	۰/۲۱
۸	۱۲۵	۲۵٪	۲۴/۶۳	٪-۴۴	۰/۷۴	٪-۲۶	۳۹/۶	٪-۱۳	۰/۱۵
۹	۱۵۰	۵۰٪	۱۲/۷۴	٪-۷۱	۰/۵۷	٪-۴۳	۳۲/۴	٪-۲۹	۰/۰۸
۱۰	۱۷۵	۷۵٪	۶/۵۳	٪-۸۵	۰/۴۷	٪-۵۳	۲۳	٪-۴۹	۰/۰۶
۱۱	۲۰۰	۱۰۰٪	۳/۰۶	٪-۹۳	۰/۳۷	٪-۶۳	۱۶/۱	٪-۶۵	۰/۰۴

۵۲۳۵ با تنش تسلیم ۲۱۵ مگاپاسکال بود، جهت بررسی اثر تنش تسلیم میله، از مدل های با مصالح ۳۲۷۵ و ۳۳۵۵ به ترتیب با تنش تسلیم های ۲۴۵/۱ و ۳۲۲/۵ مگاپاسکال (۱۴ و ۵۰ درصد افزایش

۴-۳- تأثیر تنش تسلیم (مصالح) میله

در این قسمت تأثیر ایجاد تغییر در تنش تسلیم میله (مصالح میله) بر میزان اتلاف انرژی بررسی می گردد. مصالح میله در مدل مینا

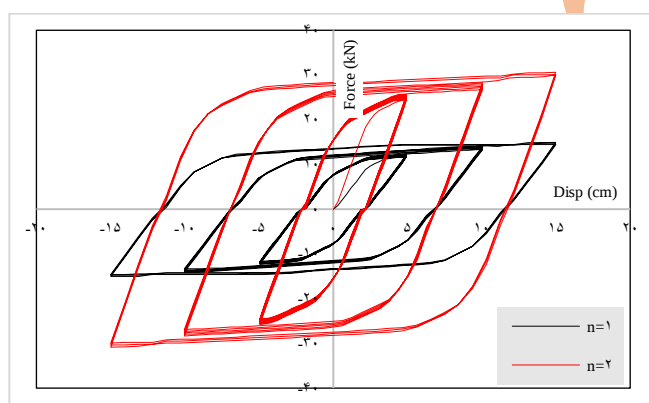


شکل ۱۰: منحنی‌های هیستریزیس برای تنش تسلیم‌های مختلف (f_y)

تنش تسلیم) استفاده شد. پس از تحلیل مدل‌ها، منحنی‌های هیستریزیس مطابق شکل (۱۰) حاصل گردید. باتوجه به شکل (۱۰) و رابطه (۶) مشاهده می‌گردد که با افزایش تنش تسلیم میله، نیروی تسلیم نیز بیشتر شده و منحنی‌های هیستریزیس بزرگ‌تر می‌گردند از این رو میزان اتلاف انرژی در میله‌ها بیشتر می‌شود. مقدار اتلاف انرژی برای مدل‌های مختلف مطابق جدول (۶) است. باتوجه به این جدول مشاهده می‌گردد که افزایش ۱۴ و ۵۰ درصدی در تنش تسلیم میله‌ها، به ترتیب موجب افزایش ۸ و ۱۳ درصدی در میزان اتلاف انرژی شده است. با این وجود مقایسه میرایی مؤثر نشان می‌دهد که با افزایش تنش تسلیم، مقدار میرایی مؤثر کاهش ۳ و ۱۱ درصدی خواهد داشت.

جدول ۶: تغییرات معیارهای ارزیابی نسبت به تغییر تنش تسلیم (مصلح میله)

شماره مدل	تنش تسلیم (MPa)	تغییر تنش تسلیم (درصد)	انرژی تلف شده (kJ)	تغییرات اتلاف انرژی بر حسب درصد	K_{eff}	تغییرات K_{eff}	$\xi_{eff}(\%)$	تغییرات ξ_{eff}	PEEQ
۱	۲۱۵	-	۴۳/۹۳	-	۱	-	۴۵/۵	-	۰/۲۷
۱۲	۲۴۵/۱	۱۴٪	۴۷/۲۹	۸٪	۱/۱۴	۱۴٪	۴۴	٪-۳	۰/۲۹
۱۳	۳۲۲/۵	۵۰٪	۴۹/۶۳	۱۳٪	۱/۴۱	۴۲٪	۴۰/۵	٪-۱۱	۰/۲۵



شکل ۱۱: منحنی‌های هیستریزیس برای تعداد میله (n)

۴-۴- تأثیر تعداد میله

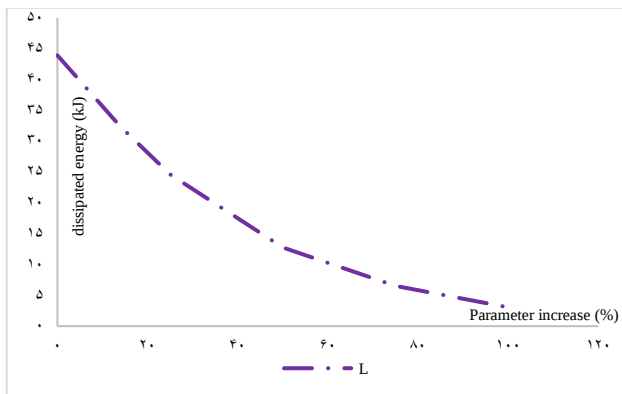
در این بخش تأثیر افزایش تعداد میله بر میزان اتلاف انرژی بررسی می‌گردد. برای این منظور از یک مدل با دو میله با مشخصات مطابق مدل مبنا استفاده می‌شود. منحنی‌های هیستریزیس و مقادیر اتلاف انرژی برای این مدل‌ها مطابق شکل (۱۱) و جدول (۷) است. باتوجه به جدول (۷) مشاهده می‌گردد، با دوبرابر شدن تعداد میله (افزایش ۱۰۰ درصدی در تعداد میله)، انرژی تلف شده ۱۰۸ درصد افزایش می‌یابد. اختلاف هشت درصدی در اتلاف انرژی نسبت به تعداد میله، به دلیل تغییر شرایط مرزی و افزایش سختی تکیه‌گاه میله‌ها است.

جدول ۷: تغییرات معیارهای ارزیابی نسبت به تغییر تعداد میله

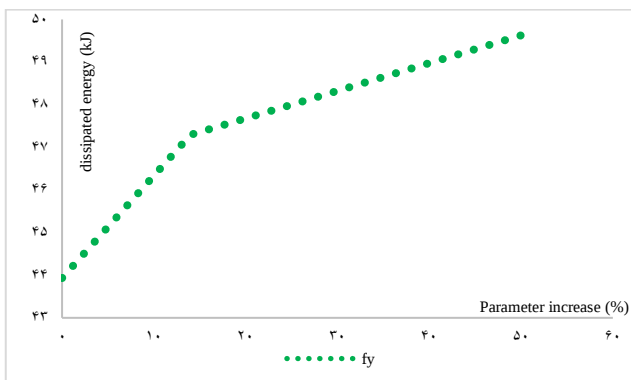
شماره مدل	تعداد میله	تغییر تعداد میله (درصد)	انرژی تلف شده (kJ)	تغییرات اتلاف انرژی بر حسب درصد	K_{eff}	تغییرات K_{eff}	$\xi_{eff}(\%)$	تغییرات ξ_{eff}	PEEQ
۱	۱	-	۴۳/۹۳	-	۱	-	۴۵/۵	-	۰/۲۷
۱۴	۲	۱۰۰٪	۹۱/۵۳	۱۰۸٪	۲/۱	۱۰۵٪	۴۶	۱٪	۰/۳

۵ - بررسی و مقایسه نتایج

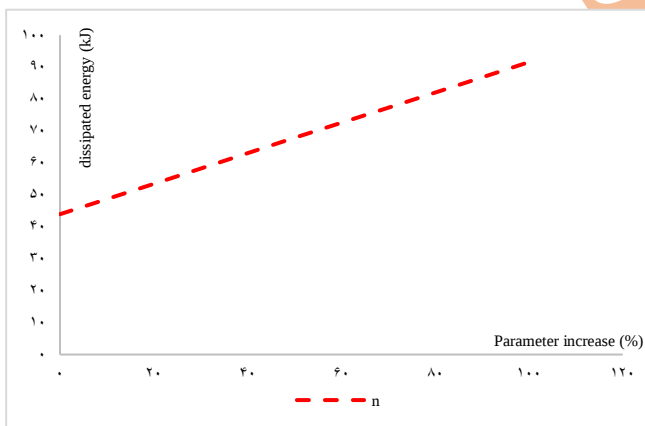
در بخش‌های قبل اثر تغییر در مقدار هر مؤلفه بر میزان اتلاف انرژی به صورت جداگانه بررسی شد. خلاصه‌ای از نتایج بخش‌های قبل مطابق جدول (۸) است. همان‌طور که در این جدول مشخص است و با توجه به اشکال (۱۲-۱۶) مشخص است که با افزایش قطر، تنش تسلیم و تعداد میله، انرژی تلف شده افزایش یافته و با افزایش طول میله، انرژی تلف شده کم می‌گردد. همچنین ترتیب بیشترین حساسیت انرژی تلف شده نسبت به مؤلفه‌های مختلف عبارت است از قطر میله، تعداد میله، طول میله و در انتها تنش تسلیم (جنس میله). به طور مثال با افزایش ۵۰ درصدی قطر میله، انرژی تلف شده ۳۴۰ درصد افزایش یافته در صورتی که با افزایش ۵۰ درصدی طول و تنش تسلیم میله، انرژی تلف شده به ترتیب ۷۱- درصد و ۱۳ درصد تغییر می‌کند. همچنین با افزایش ۱۰۰ درصدی قطر میله، انرژی تلف شده ۱۰۸۲ درصد افزایش یافته، در صورتی که با افزایش ۱۰۰ درصدی طول و تعداد میله، مقدار انرژی تلف شده به ترتیب ۹۳- درصد و ۱۰۸ درصد تغییر می‌کند.



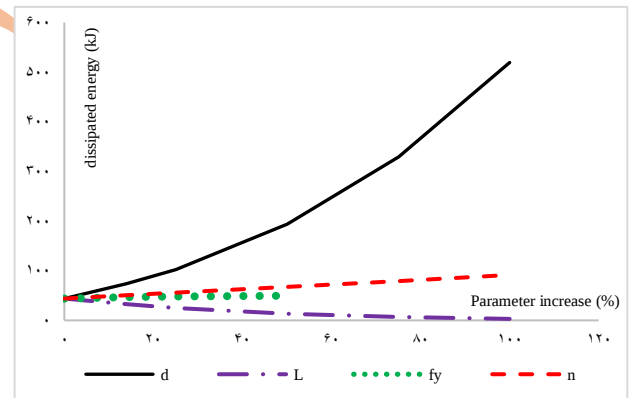
شکل ۱۴: تغییرات انرژی تلف شده نسبت به درصد تغییرات طول میله



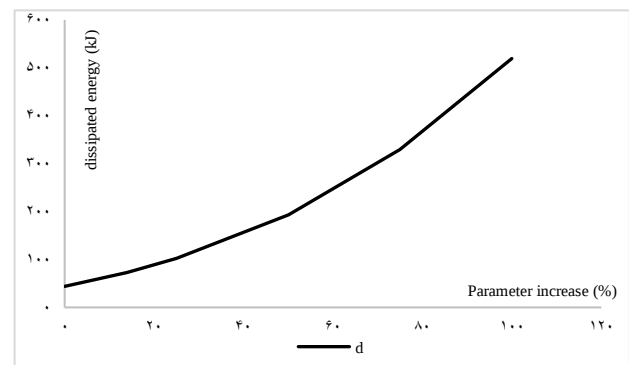
شکل ۱۵: تغییرات انرژی تلف شده نسبت به درصد تغییرات تنش تسلیم میله



شکل ۱۶: تغییرات انرژی تلف شده نسبت به درصد تغییرات تعداد میله



شکل ۱۲: تغییرات انرژی تلف شده نسبت به درصد تغییرات مؤلفه‌های مختلف



شکل ۱۳: تغییرات انرژی تلف شده نسبت به درصد تغییرات قطر میله

جدول ۸: تغییرات انرژی تلف شده نسبت به تغییر مؤلفه‌های مختلف

شماره مدل	مؤلفه متغیر	افزایش مؤلفه متغیر (درصد)	انرژی تلف شده (kJ)	تغییرات اتلاف انرژی بر حسب درصد
۱	مدل مینا	-	۴۳/۹۳	-
۲	d=۷/۹۸	۱۴٪	۷۳/۵۳	۶۷٪
۳	d=۸/۷۵	۲۵٪	۱۰۲	۱۳۲٪
۴	d=۱۰/۵	۵۰٪	۱۹۳/۲۴	۳۴۰٪
۵	d=۱۲/۲۵	۷۵٪	۳۲۹/۸۸	۶۵۱٪
۶	d=۱۴	۱۰۰٪	۵۱۹/۳۸	۱۰۸۲٪
۷	L=۱۱۴	۱۴٪	۳۲/۴	٪-۲۶
۸	L=۱۲۵	۲۵٪	۲۴/۶۳	٪-۴۴
۹	L=۱۵۰	۵۰٪	۱۲/۷۴	٪-۷۱
۱۰	L=۱۷۵	۷۵٪	۶/۵۳	٪-۸۵
۱۱	L=۲۰۰	۱۰۰٪	۳/۰۶	٪-۹۳
۱۲	f _y =۲۴۵/۱	۱۴٪	۲۴۵/۱	۸٪
۱۳	f _y =۳۲۲/۵	۵۰٪	۳۲۲/۵	۱۳٪
۱۴	n=۲	۱۰۰٪	۲۱۵	۱۰۸٪

مصلح تسلیم شونده میله، بیشترین تأثیر را بر میزان اتلاف انرژی دارد. افزایش طول میله نیز به علت کاهش سختی، موجب کاهش میزان جذب انرژی می‌گردد. مؤلفه تعداد میله نیز با میزان جذب انرژی رابطه مستقیم دارد. همچنین با افزایش میزان تنش تسلیم، به علت افزایش نیروی تسلیم میله، میزان جذب انرژی افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که با افزایش ۵۰ درصدی در مؤلفه‌های قطر، طول و تنش تسلیم میله مشاهده شد انرژی تلف شده به ترتیب ۳۴۰، ۷۱- و ۱۳ تغییر می‌کند.

بررسی‌های مربوط به میرایی مؤثر نشان داد که افزایش قطر میله موجب افزایش میرایی مؤثر و افزایش طول و تنش تسلیم میله موجب کاهش آن می‌گردند. افزایش تعداد میله نیز تأثیری بر میزان میرایی مؤثر ندارد.

باتوجه به عدم مدل‌سازی آسیب در مدل‌های عددی پژوهش حاضر، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده جهت بررسی دقیق‌تر رفتار میراگر، آسیب فولاد مدل شده و بارگذاری تا لحظه شکست ادامه یابد.

منابع

- Vasseghi, A., ۲۰۱۱. Energy dissipating shear key for precast concrete girder bridges. *Scientia Iranica*, 18 (۳), pp. ۲۹۶-۳۰۳. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.05.036>
- Dicleli, M. and Salem Milani, A., ۲۰۱۵. An innovative hysteretic damper with adaptive post-elastic stiffness for seismic protection of bridges. *Bridge Structures*, 11 (۴), pp. ۱۳۱-۱۴۰. <https://doi.org/10.1007/BRS-140074>
- Xiang, N. and Li, J., ۲۰۱۶. Seismic performance of highway bridges with different transverse unseating-prevention devices. *Journal of Bridge Engineering*, 21 (۹), p. ۰۴۰۱۶۰۴۵. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0000909](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000909)
- Shen, X., Wang, X., Ye, Q. and Ye, A., ۲۰۱۷. Seismic performance of transverse steel damper seismic system for long span bridges. *Engineering Structures*, 141, pp. ۱۴-۲۸. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.03.014>
- Zhou, L., Wang, X. and Ye, A., ۲۰۱۹. Shake table test on transverse steel damper seismic system for long span cable-stayed bridges. *Engineering Structures*, 179, pp. ۱۰۶-۱۱۹. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.073>

۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر ایجاد تغییر در مؤلفه‌های مختلف میراگرهای میله‌ای کنسولی بر میزان اتلاف انرژی، سختی مؤثر، میرایی مؤثر و کرنش پلاستیک معادل بررسی شد. مؤلفه‌هایی که در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفتند عبارتند از: قطر میله، طول میله، تنش تسلیم میله و تعداد میله. جهت بررسی از نرم‌افزار اجزا محدودی آباکوس استفاده شد. جهت انجام تحلیل مدل‌ها تحت بارگذاری چرخه‌ای مطابق شیوه‌نامه بارگذاری ASCE ۷-۲۲ قرار گرفتند. برای انجام تحلیل حساسیت این میراگر ۱۴ مدل مختلف در نظر گرفته شد.

نتایج بررسی‌ها نشان داد که با افزایش مؤلفه‌های قطر، تعداد و تنش تسلیم میله میزان اتلاف انرژی افزایش یافته و با افزایش طول میله انرژی تلف شده کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد اتلاف انرژی در این میراگر بیشترین حساسیت را به ترتیب نسبت به قطر میله، تعداد میله، طول میله و تنش تسلیم میله دارد. با افزایش قطر میله از طرفی به علت سخت‌تر شدن میله و از طرف دیگر به علت افزایش

- seismic devices. *In Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering*, pp. ۱-۱۴.
۱۴. Zlatkov, D., Ristić, D., Zorić, A., Ristić, J., Mladenović, B., Petrović, Ž. and Trajković-Milenković, M., ۲۰۲۲. Experimental and numerical study of energy dissipation components of a new metallic damper device. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 10(۵), pp. ۱۸۰۹-۱۸۲۹. <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00480-4>.
۱۵. Hu, S., Meng, D., Hu, R. and Yang, M., ۲۰۲۳. A combined viscous-steel damping system (CVSDS) for longitudinal vibration mitigation of a long-span railway suspension bridge. *Journal of Earthquake Engineering*, 27(۵), pp. ۱۲۶۱-۱۲۸۰. <https://doi.org/10.1080/13632469.2022.2074910>
۱۶. Gao, H. and Wang, J., ۲۰۲۰. Research on differences between cylindrical and E-shaped dampers for the bidirectional seismic control. *Journal of Bridge Engineering*, 25 (۴), p. ۰۴۰۲۰۰۰۸. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-0092.0001034](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-0092.0001034)
۱۷. European Assessment Document (EAD ۲۰۰۰۱۷-۰۰-۰۳۰۲), ۲۰۱۵. Hot Rolled Products And Structural Components Made Of Steel Grades Q۳۵۵B, Q۳۵۵D, Q۳۵۵B AND Q۳۵۵D, *European Assessment Document*.
۱۸. Chopra, A.K., ۲۰۲۰. Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering, ed. ۵. *university of california at Berkeley*.
۱۹. American Society of Civil Engineers, ۲۰۲۲. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structure, *American Society of Civil Engineers*. <https://doi.org/10.1061/9780784410788>
۲۰. Haeri, A. H., Badamchi, K. and Tajmir Riahi, H., ۲۰۱۹. Proposing a new hybrid friction–yielding–elastomeric bearing. *Journal of Vibration and Control*, 25 (۹), pp. ۱۵۵۸-۱۵۷۱. <https://doi.org/10.1177/1077046319829030>
۲۱. Fahimpour, V. and Abbasnia, R., ۲۰۰۸. Investigating the effect of energy dissipative element on the ductility of concentric braces. *Iranian Rehabilitation National Conference*. <https://civilica.com/doc/46451> [In Persian].
۲۲. Banisheikholeslami, A., Behnamfar, F. and Ghandil, M., ۲۰۱۶. A beam-to-column connection with visco-elastic and hysteretic dampers for seismic damage control. *Journal of Constructional Steel Research*, 117, pp. ۱۸۵-۱۹۵. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.10.017>
۲۳. Golzan, S. B., Langlois, S. and Legeron, F. P., ۲۰۱۷. Implementation of a simplified method in design of hysteretic dampers for isolated highway bridges. *Journal of Bridge Engineering*, 22 (۳), p. ۰۴۰۱۶۱۲۷. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-0092.0001034](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-0092.0001034)
۲۴. Aghlara, R. and Tahir, M. M., ۲۰۱۸. A passive metallic damper with replaceable steel bar components for earthquake protection of structures. *Engineering structures*, 159, pp. ۱۸۵-۱۹۷. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.12.049>
۲۵. Aghlara, R., Tahir, M. M. and Adnan, A. B., ۲۰۱۸. Experimental study of pipe-fuse damper for passive energy dissipation in structures. *Journal of Constructional Steel Research*, 148, pp. ۳۵۱-۳۶۰. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.044>
۲۶. Liu, M., Gao, H., Wang, J., Huang, Y. and Dong, Z., ۲۰۲۳. Study on seismic performance of functionally integrated cylindrical steel damper bearing with energy dissipation and spacing. *In Structures* 56, p. ۱۰۴۹۶۳. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.104963>
۲۷. Chiarotto, D., Tomaselli, F., Baldo, P., Castellano, M. G. and Infanti, S., ۲۰۰۴. Seismic protection of Tuy Medio railway viaducts: design and shaking table tests of the